

Windkraftanlagen

Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit

Bearbeitet von
Erich Hau

5., neu bearbeitete Auflage 2014. Buch. XXII, 969 S. Hardcover
ISBN 978 3 642 28876 0
Format (B x L): 16,8 x 24 cm

[Weitere Fachgebiete > Technik > Energietechnik, Elektrotechnik](#)

schnell und portofrei erhältlich bei


The logo for beck-shop.de features the text 'beck-shop.de' in a bold, red, sans-serif font. Above the 'i' in 'shop' are three red dots of varying sizes, arranged in a slight arc. Below the main text, the words 'DIE FACHBUCHHANDLUNG' are written in a smaller, red, all-caps, sans-serif font.

beck-shop.de
DIE FACHBUCHHANDLUNG

Die Online-Fachbuchhandlung beck-shop.de ist spezialisiert auf Fachbücher, insbesondere Recht, Steuern und Wirtschaft. Im Sortiment finden Sie alle Medien (Bücher, Zeitschriften, CDs, eBooks, etc.) aller Verlage. Ergänzt wird das Programm durch Services wie Neuerscheinungsdienst oder Zusammenstellungen von Büchern zu Sonderpreisen. Der Shop führt mehr als 8 Millionen Produkte.

Inhaltsverzeichnis

Häufig verwendete Symbole	XXI
1 Windmühlen und Windräder	1
1.1 Über die Ursprünge der Windmühlen	1
1.2 Europäische Windmühlentypen	4
1.3 Wirtschaftliche Bedeutung der Windmühlen	12
1.4 Wissenschaft und technische Entwicklung im Windmühlenbau	14
1.5 Die amerikanische Windturbine	18
Literatur	22
2 Strom aus Wind – Die ersten Versuche	23
2.1 Poul La Cour – Ein Pionier in Dänemark	23
2.2 Windkraftwerke – Große Pläne in Deutschland	29
2.3 1250 kW aus dem Wind – Die erste Großanlage in den USA	33
2.4 Windkraftanlagen in den 50er Jahren – Vor der Energiekrise	36
2.5 Nach der Energiekrise – Aufbruch in die moderne Windenergienutzung	44
2.6 Die großen Versuchsanlagen der 80er Jahre	47
2.7 Der erste Erfolg der kleinen Windkraftanlagen in Dänemark	57
2.8 Die amerikanischen Windfarmen	59
Literatur	64
3 Bauformen von Windkraftanlagen	67
3.1 Rotoren mit vertikaler Drehachse	68
3.2 Horizontalachsen-Rotoren	71
3.3 Windenergie-Konzentratoren	74
3.4 Begriffe und Bezeichnungen	79
Literatur	80
4 Physikalische Grundlagen der Windenergieumwandlung	81
4.1 Die elementare Impulstheorie nach Betz	81
4.2 Widerstands- und auftriebsnutzende Windenergieumwandler	86
Literatur	90

5	Aerodynamik des Rotors	91
5.1	Physikalisch-mathematische Modelle und Verfahren	92
5.1.1	Blatteleumentheorie	93
5.1.2	Wirbelmodell der Rotorströmung	98
5.1.3	Numerische Strömungssimulation	100
5.1.4	Rotornachlaufströmung	102
5.2	Leistungscharakteristik des Rotors	106
5.2.1	Rotorleistungskennfeld und Drehmomentenkennfeld	106
5.2.2	Leistungscharakteristiken verschiedener Rotorbauarten	108
5.3	Aerodynamische Leistungsregelung	110
5.3.1	Blatteinstellwinkelregelung	111
5.3.2	Leistungsbegrenzung durch Strömungsablösung (Stall)	116
5.3.3	Aktive Steuerung der Strömungsablösung	121
5.3.4	Instationäre Effekte und Grenzschichtbeeinflussung	122
5.3.5	Aus dem Wind drehen	125
5.4	Das aerodynamische Profil	126
5.4.1	Charakteristische Eigenschaften	126
5.4.2	Profilgeometrie und Systematik	129
5.4.3	Laminarprofile	134
5.4.4	Einflußauf den Rotorleistungsbeiwert	138
5.5	Konzeptionelle Rotormerkmale und Leistungscharakteristik	140
5.5.1	Anzahl der Rotorblätter	140
5.5.2	Optimale Form des Blattumrisses	142
5.5.3	Verwindung der Rotorblätter	148
5.5.4	Blattdicke	150
5.5.5	Auslegungsschnellaufzahl	151
5.6	Ausgeführte Rotorblätter	154
5.7	Windrichtungsnachführung des Rotors	157
5.8	Aerodynamik der Vertikalachsen-Rotoren	161
5.9	Experimentelle Rotor-aerodynamik	166
5.9.1	Modellmessungen im Windkanal	166
5.9.2	Messungen an Originalanlagen	169
	Literatur	171
6	Belastungen und Strukturbeanspruchungen	173
6.1	Belastungsarten und ihre Wirkung auf die Windkraftanlage	174
6.2	Koordinatensysteme und Bezeichnungen	176
6.3	Ursachen der Belastungen	177
6.3.1	Eigengewicht, Zentrifugal- und Kreiselkräfte	178
6.3.2	Gleichförmige, stationäre Rotoranströmung	179
6.3.3	Höhenprofil der Windgeschwindigkeit	183
6.3.4	Schräganströmung des Rotors	184
6.3.5	Turmmumströmung	185
6.3.6	Windturbulenz und Böen	190
6.4	Lastannahmen	194

6.4.1	Internationale und nationale Normen	195
6.4.2	Klassifizierung der Windkraftanlagen und Windzonen	198
6.4.3	Normale Windbedingungen	200
6.4.4	Extreme Windbedingungen	200
6.4.5	Andere Umwelteinflüsse	202
6.4.6	Sonstige externe Bedingungen	203
6.4.7	Sicherheitsfaktoren	204
6.5	Maschinenstatus und Lastfälle	205
6.5.1	Normaler Betrieb	206
6.5.2	Technische Störungen	208
6.6	Strukturbeanspruchung und Dimensionierung	210
6.6.1	Beanspruchungsarten	210
6.6.2	Lastkollektive	212
6.7	Strukturdynamik	215
6.7.1	Mathematische Modellierung der Windkraftanlage	215
6.7.2	Modellierung der Windturbulenz	216
6.7.3	Analytische Ansätze und numerische Simulation	220
6.8	Konzeptmerkmale und Strukturbeanspruchungen	223
6.8.1	Anzahl der Rotorblätter	223
6.8.2	Rotornabengelenke beim Zweiblattrotor	225
6.8.3	Steifigkeit der Rotorblätter	228
6.8.4	Regelungssystem	229
6.8.5	Drehzahlelastizität und drehzahlvariable Betriebsweise	232
6.9	Meßtechnische Erfassung der Strukturbeanspruchungen	235
6.9.1	Prüfstandversuche mit Rotorblättern	236
6.9.2	Datenerfassungssysteme und Messungen an Originalanlagen	237
Literatur	240
7	Schwingungsverhalten	243
7.1	Anregenden Kräfte und Schwingungsfreiheitsgrade	244
7.2	Aeroelastisches Verhalten der Rotorblätter	246
7.2.1	Statische Divergenz	247
7.2.2	Eigenfrequenzen und Schwingungsformen	248
7.2.3	Typische Rotorblattschwingungen	250
7.3	Torsionsschwingungen des Triebstrangs	252
7.3.1	Mechanisches Ersatzmodell	253
7.3.2	Ersatzmodelle für die elektrische Netzkopplung	256
7.3.3	Eigenfrequenzen und Eigenschwingungsformen	257
7.3.4	Schwingungsanregungen und Resonanzen	260
7.4	Dynamik der Windrichtungsnachführung	262
7.4.1	Mechanisches Modell und Momente um die Hochachse	263
7.4.2	Schwingungsanregungen und Resonanzen	265
7.5	Schwingungen der Gesamtanlage	267
7.5.1	Turmsteifigkeit	267
7.5.2	Resonanzdiagramme ausgeführter Anlagen	269

7.6	Rechnerische Simulation des Schwingungsverhaltens	275
	Literatur	278
8	Rotorblätter	281
8.1	Materialfragen	282
8.2	Vorbild: Flugzeugtragflügel	284
8.3	Frühere experimentelle Bauweisen von Rotorblättern	287
8.3.1	Genietete Aluminiumkonstruktionen	287
8.3.2	Stahlbauweisen	289
8.3.3	Traditionelle Holzbauweise	293
8.3.4	Ältere Faserverbundbauweisen	294
8.3.5	Holz-Epoxid-Verbundbauweise	299
8.4	Moderne Rotorblätter in Faserverbundtechnik	300
8.4.1	Faserverbund-Technologie	300
8.4.2	Konstruktive Auslegung der Rotorblätter	302
8.4.3	Fertigungsverfahren	303
8.5	Blattanschluss an die Rotornabe	307
8.6	Rotorblattbauweisen im Vergleich	311
8.7	Aerodynamische Bremsklappen	315
8.8	Blitzschutz	316
8.9	Enteisung	317
	Literatur	318
9	Mechanischer Triebstrang und Maschinenhaus	321
9.1	Grundsätzliche Überlegung zur Leistungsübertragung	322
9.2	Triebstrang mit Übersetzungsgetriebe	325
9.2.1	Experimentelle Konzeptionen	325
9.2.2	Heutige Bauweisen mit schnellaufendem Generator	327
9.2.3	Mittelschnellaufende Triebstrangauslegung	331
9.3	Getriebelose Bauart	333
9.3.1	Ringgenerator mit elektrischer Erregung	333
9.3.2	Permanentmagnet-Generator	334
9.4	Triebstrangkonzeptionen im Vergleich	335
9.4.1	Triebstrangkonzepktion und Baumasse	335
9.4.2	Perspektiven bei zunehmender Anlagengröße	338
9.5	Rotornabe	342
9.5.1	Ältere Nabenbauarten	342
9.5.2	Gegossene Rotornaben für Dreiblattrotoren	344
9.5.3	Rotornabenbauarten für Zweiblattrotoren	345
9.6	Blattverstellmechanismus	349
9.6.1	Rotorblattlagerung	351
9.6.2	Blattverstellungssysteme mit hydraulischem Antrieb	353
9.6.3	Elektromotorische Blattverstellung	358
9.6.4	Passive Blattverstellung	360
9.6.5	Redundanz- und Sicherheitsfragen	361

9.7	Rotorlagerung	363
9.7.1	Lagerprobleme	364
9.7.2	Rotorwelle mit separaten Lagern	366
9.7.3	Dreipunkt-Lagerung von Rotorwelle und Getriebe	368
9.7.4	„Einlager“-Konzeption	369
9.7.5	Rotorlagerung auf einer feststehenden Achse	371
9.8	Rotorbremse	373
9.9	Übersetzungsgetriebe	376
9.9.1	Getriebebauarten	376
9.9.2	Äußere Belastungsvorgaben für die Getriebeauslegung	380
9.9.3	Innere Getriebedimensionierung und konstruktive Auslegung	383
9.9.4	Wirkungsgrad und Geräuscentwicklung	384
9.10	Drehzahlvariable Überlagerungsgetriebe	387
9.11	Torsionselastizität im mechanischen Triebstrang	389
9.12	Einbau des elektrischen Generators	392
9.13	Maschinenhaus	395
9.13.1	Bauweise und statische Konzeption	395
9.13.2	Hilfsaggregate und sonstige Einbauten	397
9.13.3	Äußere Form – ästhetische Gesichtspunkte	401
9.14	Windrichtungsnachführung	404
9.15	Funktionsprüfung und Serienfertigung	408
	Literatur	410
10	Elektrisches System	411
10.1	Generatorbauarten	412
10.1.1	Synchrongenerator	412
10.1.2	Asynchrongenerator	416
10.1.3	Permanentmagnet-Generatoren	420
10.2	Beurteilungskriterien für den Einsatz elektrischer Generatoren in Windkraftanlagen	422
10.3	Drehzahlfeste Generatoren mit direkter Netzkopplung	425
10.3.1	Synchrongenerator mit direkter Netzkopplung	426
10.3.2	Asynchrongenerator mit direkter Netzkopplung	427
10.3.3	Asynchrongenerator mit variablem Schlupf	429
10.3.4	Drehzahlgestufte Generatorsysteme	430
10.4	Drehzahlvariable Generatorsysteme mit Frequenzumrichter	432
10.4.1	Frequenzumrichter	433
10.4.2	Generator mit Vollumrichter	436
10.4.3	Asynchrongenerator mit übersynchroner Stromrichter-kaskade	438
10.4.4	Doppeltgespeister Asynchrongenerator	439
10.5	Direkt vom Rotor angetriebene drehzahlvariable Generatoren	442
10.5.1	Synchrongenerator mit elektrischer Erregung	442
10.5.2	Generator mit Permanentmagnet-Erregung	446
10.6	Elektrische Gesamtausrüstung der Windkraftanlage	450
10.6.1	Große Anlagen	450

10.6.2	Kleine und mittlere Anlagen	452
10.7	Elektrotechnische Konzeptionen im Vergleich	454
	Literatur	456
11	Regelung und Betriebsführung	459
11.1	Betriebsdatenerfassung	462
11.1.1	Betriebswindmeßsystem	463
11.1.2	Elektrische Leistungsmessung	465
11.1.3	Sonstige Betriebsdaten	466
11.2	Technologie und Charakteristik der Regler	467
11.3	Windrichtungsnachführung	469
11.4	Leistungsregelung mit Blatteinstellwinkelregelung	471
11.4.1	Mathematische Modellierung	471
11.4.2	Drehzahlfeste Generatoren im Netzparallelbetrieb	474
11.4.3	Netzparallelbetrieb mit drehzahlvariablen Generatorsystemen	479
11.4.4	Inselbetrieb ohne Drehzahlführung durch das Netz	481
11.5	Leistungsbegrenzung durch den aerodynamischen Stall	483
11.5.1	Netzparallelbetrieb mit festem Blatteinstellwinkel	483
11.5.2	Inselbetrieb mit festem Blatteinstellwinkel	484
11.5.3	Stall-Regelung mit verstellbarem Blatteinstellwinkel	485
11.6	Betriebszyklus und Sicherheitssystem	488
11.6.1	Betriebszustände	489
11.6.2	Sicherheitssystem	491
11.7	Bauliche Realisierung des Regelungssystems	492
11.8	Zusammenwirken mit dem Stromnetz	494
	Literatur	497
12	Turm und Fundament	499
12.1	Turmbauarten und Varianten	500
12.2	Festigkeits- und Steifigkeitsanforderungen	505
12.3	Turmauslegung nach deutschen Bauvorschriften	506
12.4	Freitragende Stahlrohrtürme	507
12.4.1	Steifigkeit und Baumasse	508
12.4.2	Konstruktion und Fertigungstechnik	510
12.4.3	Aufstiegshilfen und Einbauten	514
12.5	Gittertürme	517
12.6	Betontürme	520
12.6.1	Ortbeton-Bauweise	521
12.6.2	Beton-Fertigteilmbauweise	522
12.7	Beton/Stahl-Hybridtürme	524
12.8	Turm-Konzeptionen im Vergleich	527
12.9	Optimale Turmhöhe	529
12.10	Fundament	532
12.10.1	Dimensionierende Lasten und Bodenbeschaffenheit	532
12.10.2	Fundamentbauarten	533

12.10.3	Einbindung des Turmes im Fundament	534
12.10.4	Typische Ausführungsbeispiele	536
Literatur		538
13	Windverhältnisse	539
13.1	Ursachen des Windes und Energieinhalt	539
13.2	Globale Verteilung der mittleren Windgeschwindigkeiten	542
13.3	Windverhältnisse in Europa und in Deutschland	549
13.4	Charakteristische Größen und Gesetzmäßigkeiten	553
13.4.1	Mittlere Jahreswindgeschwindigkeit und Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeiten	553
13.4.2	Zunahme der Windgeschwindigkeit mit der Höhe	556
13.4.3	Stetigkeit des Windes	559
13.4.4	Windturbulenz und Böen	566
13.5	Lokale Windverhältnisse – Topographie und Hindernisse	568
13.6	Ermittlung der Windgeschwindigkeit	570
13.6.1	Messungen mit Anemometern und stationärem Windmeßmast	572
13.6.2	SODAR und LIDAR	576
13.6.3	Ermittlung der Winddaten und der Energielieferung nach dem Europäischen Windatlas	577
13.6.4	Numerische Modelle zur Simulation von dreidimensionalen Windfeldern	580
13.6.5	Über das Windenergiepotential	582
Literatur		587
14	Leistung und Energielieferung	589
14.1	Vom Rotorleistungskennfeld zur effektiven Anlagenleistung	590
14.1.1	Installierte Generatorleistung und Rotordrehzahl	590
14.1.2	Leistungsverluste durch Regelung und Betriebsführung	595
14.1.3	Verluste im mechanisch-elektrischen Triebstrang	596
14.1.4	Leistungsbeiwerte ausgeführter Anlagen	599
14.2	Leistungskennlinie	601
14.2.1	Normierte Leistungskennlinie	601
14.2.2	Vermessung der Leistungskennlinie	603
14.3	Aufstellortbezogene Einflüsse auf die Leistungskennlinie	609
14.3.1	Schwieriges Gelände	609
14.3.2	Luftdichte	610
14.3.3	Turbulenz	613
14.3.4	Sonstige wetterbedingte Einflüsse	615
14.3.5	Verschmutzung und Abnutzung der Rotorblätter	615
14.3.6	Schallreduzierter Betrieb	616
14.4	Gleichförmigkeit der Leistungsabgabe	618
14.5	Jahresenergielieferung	620
14.5.1	Berechnungsverfahren	620
14.5.2	Näherungsweise Ermittlung der Energielieferung	622

14.5.3	Sensitivität bezüglich der Winddaten	625
14.5.4	Technische Verfügbarkeit und Kapazitätsfaktor	626
14.5.5	Energielieferungsprognosen für Projektfinanzierungen	630
14.6	Wichtige Entwurfsparameter und Energielieferung	631
14.6.1	Anlagen-Leistungsbeiwert	632
14.6.2	Rotordurchmesser	633
14.6.3	Optimale Rotordrehzahl und Drehzahlvariabilität	635
14.6.4	Leistungsregelung	638
14.6.5	Installierte Generatorleistung	639
14.6.6	Nabenhöhe des Rotors	641
14.6.7	Betriebswindgeschwindigkeitsbereich	642
14.6.8	Die Windkraftanlage als Energiewandler — eine grundsätzliche Betrachtung	643
	Literatur	644
15	Umweltverhalten	647
15.1	Gefahren für die Umgebung	648
15.1.1	Wie weit kann ein Rotorblatt fliegen?	648
15.1.2	Risikobetrachtungen	651
15.2	Schallemissionen	652
15.2.1	Akustische Kenngrößen und zulässige Immissionswerte	652
15.2.2	Geräuschquellen bei Windkraftanlagen	653
15.2.3	Schalleistungspegel	657
15.2.4	Schallausbreitung	660
15.3	Schattenwurf	664
15.4	Störungen von Funk und Fernsehen	667
15.5	Störungen der Vogelwelt	669
15.6	Landverbrauch	670
15.7	Optische Beeinträchtigung der Landschaft	673
15.8	Windenergienutzung und Klimaschutz	674
15.8.1	Einflußauf das Umgebungsklima	674
15.8.2	Nutzung der Windkraft und CO ₂ -Emissionen	676
	Literatur	678
16	Anwendungskonzeptionen und Einsatzbereiche	681
16.1	Windkraftanlagen im Inselbetrieb	682
16.1.1	Autonome Stromversorgung mit Windenergie – die Speicherpro- blematik	683
16.1.2	Heizen mit Windenergie	689
16.1.3	Wasserpumpen	692
16.1.4	Entsalzen von Meerwasser	695
16.2	Inselnetze mit Dieselgeneratoren und Windkraftanlagen	698
16.3	Windkraftanlagen im Verbund mit dem Stromnetz	702
16.3.1	Einzelanlagen im Netzparallelbetrieb	703
16.3.2	Windfarmen und Windparks	704

16.4	Windkraftanlagen im Kraftwerksverbund	708
16.4.1	Die Regelungsproblematik	709
16.4.2	Das Verbundnetz	711
16.4.3	Beitrag zur gesicherten Leistung	713
16.5	Windkraftanlagenindustrie und Absatzmärkte	714
16.5.1	Historische Entwicklung der Absatzmärkte	715
16.5.2	Die Windkraftanlagenhersteller	717
16.5.3	Zuliefererindustrie und Dienstleistungsunternehmen	720
Literatur	723
17	Windenergienutzung im Küstenvorfeld der Meere	725
17.1	Technische Probleme der Offshore-Aufstellung von Windkraftanlagen . .	726
17.1.1	Technische Anforderungen an die Windkraftanlagen	726
17.1.2	Gründung auf dem Meeresgrund	729
17.1.3	Elektrische Konzeption	738
17.2	Transport und Montage	743
17.3	Betrieb von Offshore-Windkraftanlagen	746
17.3.1	Wetterbedingte Zugänglichkeit	746
17.3.2	Wartung und Instandsetzung	747
17.4	Offshore-Windenergienutzung im Bereich der Nord- und Ostsee	749
17.4.1	Ozeanographische Bedingungen und Windverhältnisse	750
17.4.2	Völkerrechtliche Situation	754
17.4.3	Kriterien für das Genehmigungsverfahren	756
17.4.4	Die ersten Offshore-Windparks	758
17.5	Offshore-Windenergie in Europa	761
17.6	Strom aus der Nordsee für Deutschland	766
17.7	Offshore-Projekte Weltweit	769
Literatur	771
18	Planung, Errichtung und Betrieb	773
18.1	Projektentwicklung	774
18.2	Genehmigungsverfahren	776
18.2.1	Gesetze und Regelwerke	776
18.2.2	Planerische Vorgaben der Gemeinden und regionalen Gremien . .	779
18.2.3	Genehmigung von Windkraftprojekten nach BImSchG	780
18.2.4	Baugenehmigung für einzelne Anlagen	783
18.3	Technische Auslegung von Windparks	783
18.3.1	Aerodynamik der Feldaufstellung	783
18.3.2	Interne elektrische Verkabelung und Stichleitung zum Netz	788
18.3.3	Netzanschluß	793
18.4	Tiefbauarbeiten am Aufstellort	798
18.5	Transportprobleme	803
18.6	Errichtung am Aufstellort	806
18.6.1	Standardverfahren	807
18.6.2	Errichtung ohne schwere Hebezeuge	812

18.6.3	Die Montage des Maschinenhauses am Aufstellort	816
18.6.4	Große Experimentalanlagen mit Zweiblattrotor	818
18.7	Inbetriebnahme	823
18.7.1	Kommerzielle Anlagen und Windparks	824
18.7.2	Versuchsanlagen und Prototypen	825
18.8	Technische Betriebsführung	826
18.8.1	Erfassung der Betriebsdaten	827
18.8.2	Überwachung und Steuerung mit SCADA-Systemen	830
18.8.3	Technische Zustandsüberwachung – Condition Monitoring	832
18.9	Betriebssicherheit	833
18.9.1	Technische Sicherheitssysteme	834
18.9.2	Gefahren durch extreme Wetterlagen	839
18.10	Wartung und Instandsetzung	843
18.10.1	Reguläre Wartung	845
18.10.2	Schadensursachen und Reparaturrisiken	846
18.10.3	Statistische Auswertungen	850
	Literatur	851
19	Kosten von Windkraftanlagen und Anwendungsprojekten	853
19.1	Herstellkosten und Verkaufspreise von Windkraftanlagen	854
19.1.1	Spezifische Kosten und Bezugsgrößen	855
19.1.2	Die Baumasse als Grundlage zur Ermittlung der Herstellkosten	857
19.1.3	Baumassen ausgeführter Windkraftanlagen	862
19.1.4	Ermittlung der Herstellkosten mit massenbezogenen Kostenwerten	865
19.1.5	Herstellkosten der heutigen Windkraftanlagen	868
19.1.6	Konzeptionelle Merkmale und Herstellkosten	874
19.1.7	Kostendegression in der Serienfertigung	876
19.1.8	Kostensenkung durch technische Weiterentwicklung	878
19.1.9	Alternative technische Konzeptionen	879
19.1.10	Über die Entwicklungskosten von Windkraftanlagen	881
19.1.11	Entwicklung der Verkaufspreise	882
19.2	Investitionskosten von schlüsselfertigen Projekten	885
19.2.1	Projektentwicklung	885
19.2.2	Technische Infrastruktur	886
19.2.3	Sonstige Kosten	889
19.2.4	Typische Kostenbeispiele	891
19.3	Betriebskosten	894
19.3.1	Wartung und Instandsetzung	895
19.3.2	Versicherungen	897
19.3.3	Sonstige Betriebskosten	898
19.3.4	Jährliche Betriebskosten	899
19.4	Offshore-Projekte	900
19.4.1	Bestimmende Faktoren für die Investitionskosten	900
19.4.2	Entwicklung der Investitionskosten seit 1990	902
19.4.3	Typische Kostenbeispiele	903

19.4.4 Betriebskosten	906
19.4.5 Ausblick	907
Literatur	908
20 Wirtschaftlichkeit der Stromerzeugung aus Windenergie	909
20.1 Unternehmensformen und Finanzierung	910
20.2 Statische Berechnung der Stromerzeugungskosten	913
20.2.1 Einzelne Anlagen und Windparks	914
20.2.2 Offshore-Windparks	919
20.3 Dynamische Berechnung der Wirtschaftlichkeit	921
20.3.1 Kapital- oder Barwertmethode	922
20.3.2 Kapitalflußprognose für einen Windpark	924
20.4 Stromerzeugungskosten aus Windenergie im Vergleich zu anderen Energiesystemen	928
20.5 Energetische Amortisation von Windkraftanlagen	931
20.6 Beschäftigungseffekt der Windkraftnutzung	932
20.7 Bedeutung der energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen für die Nutzung der erneuerbaren Energien	933
Literatur	935
Glossar – englische Fachausdrücke	937
Deutsch – Englisch	937
Englisch – Deutsch	948
Sachverzeichnis	959